

SIMULAÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE UM FIO DE COBRE

Elizeu Fonseca Correia

Lucival Malcher

Universidade de Brasília, UnB – Brasília, DF, 70910-900

160118794@aluno.unb.br, malcher@unb.br

Resumo: Neste trabalho realizou o estudo do processo de trefilação por meio da simulação numérica aplicando o Método de Elementos Finitos (MEF). A simulação foi realizada no programa comercial Abaqus e o material adotado para o estudo foi o cobre isento de oxigênio. Metodologicamente, este trabalho consistiu inicialmente na modelagem do problema no Abaqus utilizando, como indicador de dano, o modelo de Johnson-Cook (JC). O modelo de JC implementa na simulação os efeitos de deformação plástica, velocidade de aplicação da carga e de temperatura. Através desse modelo, tornou-se possível computar o dano do material através da perda de ductibilidade do mesmo. Após o término da montagem da simulação, e do estudo de convergência de malha, os parâmetros do processo foram variados com o intuito de estudar e avaliar a influência que cada critério possui na taxa da tensão equivalente, na deformação plástica equivalente e no efeito da temperatura. Por fim, foi constatado que o comprimento da zona cilíndrica não interfere no comportamento da tensão equivalente e da deformação plástica, apenas na temperatura do processo. Uma pequena mudança do parâmetro redução de área levou grandes mudanças nos valores da tensão equivalente, da deformação plástica e da temperatura. Já o aumento da velocidade de trefilação pode ser benéfico no processo de trefilação, mas em até certos níveis; tendo em vista que a velocidades de trefilação exageradamente altas pode ocasionar a fratura do fio. Por último, observou-se que na medida que o parâmetro semiângulo de entrada acresce, a deformação plástica e a tensão equivalente aumentam, enquanto que a temperatura de trefilação diminui.

Palavras-chave: Trefilação, Parâmetros de Trefilação, Simulação Numérica, Métodos de Elementos Finitos, Modelo de Johnson-Cook

1. INTRODUÇÃO

A trefilação é um processo de conformação que altera plasticamente as dimensões do material. Ela consiste na passagem de uma barra ou de um fio metálico em uma matriz composta por canais convergentes denominada fiação. Nesse processo é aplicada uma força trativa na extremidade da barra. A combinação dessa força trativa, juntamente com as tensões compressivas oriundas do canal convergente da fiação reduzem a seção transversal da barra metálica, levando ao encruamento do material (FILHO et al., 1997). A aplicação de produtos trefilados é bastante vasta e são encontrados na fabricação de cordas para instrumentos musicais, na confecção de parafusos, pregos, de cliques de papel e até na indústria aeroespacial (PINTO, 2016).

Por causa dessa constante aplicação, estudar os processos de trefilação é um caminho para maximizar as potencialidades do processo, para que seja possível a fabricação de produtos finais aperfeiçoados e produzidos com eficiência, celeridade e economia da matéria prima escassa. Pode-se inferir que o aperfeiçoamento da técnica gera aumento de produtividade.

2. METODOLOGIA

A metodologia empregada nesse trabalho consiste em estudar os efeitos provocados em um perfil trefilado através da variação dos parâmetros de trefilação (velocidade de trefilação, semiângulo de entrada, zona cilíndrica e redução da área do fio). Ainda em relação à metodologia do trabalho, o estudo irá contemplar uma análise do comportamento das deformações plásticas equivalentes (PEEQ), das tensões residuais (S, Mises) e da variação de temperatura (T). Como a variação dos parâmetros de trefilação pode provocar danos no material trefilado, o indicador de dano será computado utilizando o modelo de Johnson-Cook.

Ademais, os resultados desse trabalho serão obtidos por meio do método de elementos finitos no programa computacional Abaqus. Inicialmente será feito o estudo da convergência de malha para determinar o tamanho de elemento. Após a seleção da malha ideal iniciar-se-á, então, diversas simulações contendo variações dos principais parâmetros de trefilação e, por fim, os resultados serão colhidos para as análises. Os valores adotados para as simulações estão representados na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros adotados para realizar as simulações

Simulação 1				Simulação 2			
Semiângulo de entrada	5°	15°	40°	Zona Cilíndrica (mm)	9,530	3,176	1,906
Zona Cilíndrica	3,176 mm			Semiângulo de entrada	9°		
Velocidade de trefilação	50 mm/s			Velocidade de trefilação	50 mm/s		
Redução de área	10%			Redução de área	10%		
Simulação 3				Simulação 4			
Velocidade de trefilação	50	100	150	Redução de área	10%	11%	15%
Zona Cilíndrica	3,176 mm			Zona Cilíndrica	3,176 mm		
Semiângulo de entrada	9°			Semiângulo de entrada	9°		
Redução de área	10%			Velocidade de trefilação	50 mm/s		

3. RESULTADOS

3.1. Estudo de Convergência de Malha

Com o intuito de obter a malha ideal para realizar as simulações, foi adotado o método da estabilização de deformação plástica equivalente (PEEQ). Após a obtenção da deformação plástica equivalente, bem como o tempo computacional gasto para os devidos cálculos, foi plotado o gráfico da deformação plástica equivalente normalizada pelo tempo computacional, representado na Fig. 1.

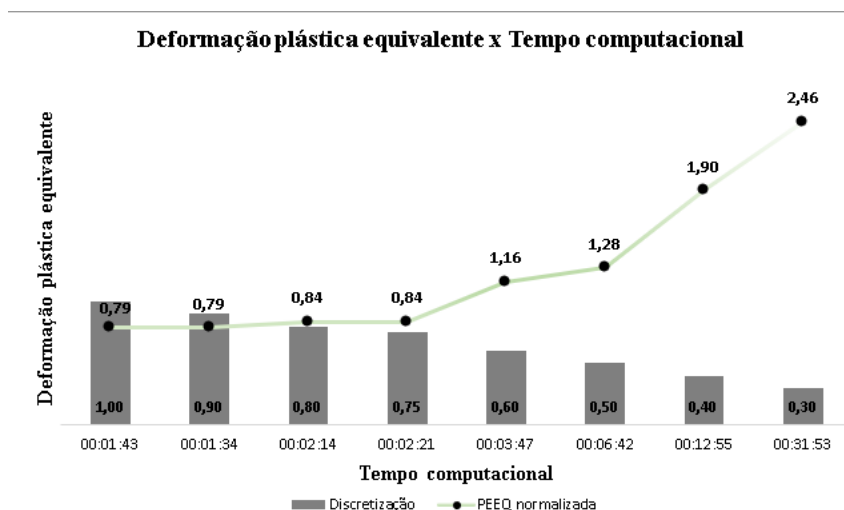


Figura 1. Dados da deformação plástica equivalente normalizada pelo tempo computacional

Analisando o comportamento da deformação plástica no gráfico representado na Figura 1, observa-se que a deformação diverge na medida que o nível de discretização aumenta, além do acréscimo do tempo computacional gasto para a realização dos cálculos. Porém, observa-se que a deformação plástica equivalente é estável para uma discretização com tamanho de elemento entre 1 e 0,75.

Sendo assim, a malha adotada para realizar as simulações possui uma discretização com tamanho de elemento igual a 0,75, composta por elementos quadráticos de ordem linear.

3.2 Validação da Simulação Numérica

A validação da simulação foi feita para garantir uma maior confiabilidade da simulação em estudo. Para isso, observou-se os efeitos já estudados e conhecidos de estudos anteriores do processo de trefilação, que são: Alongamento do fio proporcional a redução de área, redução do diâmetro final do fio pós trefilação e o aumento da temperatura quando a barra de cobre entra em contato com a fieira. A posteriori, estes efeitos foram comparados com os resultados obtidos na simulação em questão e estão expostos na Fig. 2.

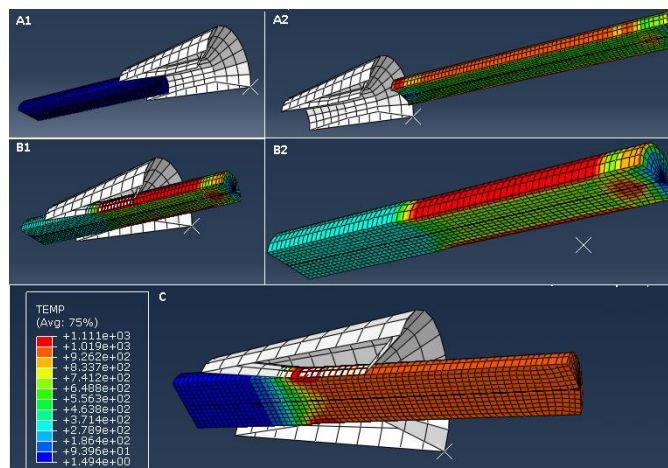


Figura 2. Validação da simulação numérica

A Figura 2-A representa o material antes de ser trefilado. A seguir, para constatar o efeito do alongamento do fio pós trefilação capturou-se uma imagem do fio trefilado, representado na Figura 2-A2. Ao realizar a comparação das Figuras 2-A1 e 2-A2, observou-se que houve o alongamento do fio em consequência da redução de área. Já na Figura 2-B1 está representado o efeito da redução de área provocado pela combinação dos esforços exercidos pela matriz na barra de cobre. Para visualizar melhor a redução de área do fio, utilizando o comando *remove select* do programa comercial *Abaqus*, a fieira foi ocultada permitindo assim uma melhor visualização do efeito da redução de área durante o processo de trefilação, representado na Figura 2-B2. Por fim, observou-se que houve o aumento da temperatura devido a fricção presente no processo durante o contato fio-fieira, efeito esse observado na Figura 2-C. Diante do exposto acima, foi feito a validação da simulação numérica do processo de trefilação e iniciou-se então o estudo dos parâmetros importante do processo.

3.2 Estudo dos parâmetros importantes do processo

3.2.1 Semiângulo de entrada

Na primeira simulação foi adotado o semiângulo de entrada equivalente a 5° . Analisando o produto após a trefilação, constata-se que não houve nenhum defeito no fio trefilado. Foi registrado uma tensão equivalente máxima (S,Mises) no valor de 24,356 MPa, uma deformação plástica máxima (PEEQ) de 0,4 e temperatura máxima (T) durante o processo equivalente a 1056°C , como representado na Fig. 3.

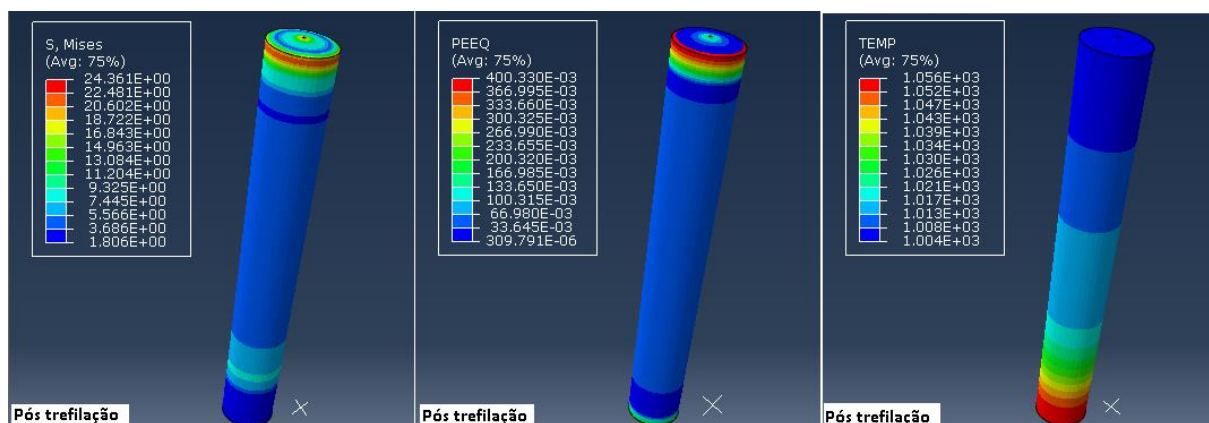


Figura 3. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para um semiângulo de entrada de 5°

Para a segunda simulação adotou um semiângulo de entrada equivalente a 15° . Este pequeno aumento no semiângulo provocou a redução de temperatura no processo de trefilação, provocou um aumento das tensões de Mises e na deformação plástica. Não observou a presença de trincas no fio trefilado, como exposto na Fig 4.

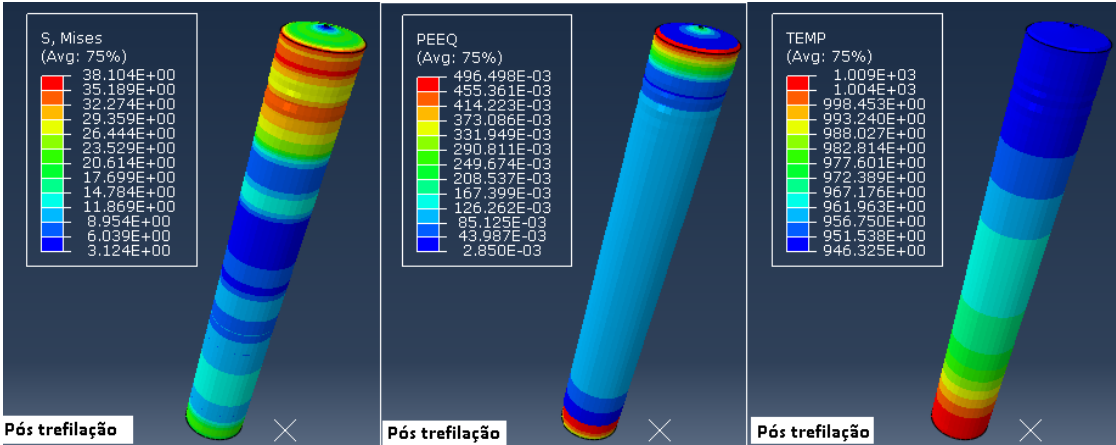


Figura 4. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para um semiângulo de entrada de 15°

A terceira simulação consistiu em um aumento acentuado do semiângulo de entrada, equivalente a 40°. Analisando os resultados obtidos após a trefilação, observa-se a presença de defeitos ao longo da superfície do fio trefilado, como ilustrado na Fig 5.

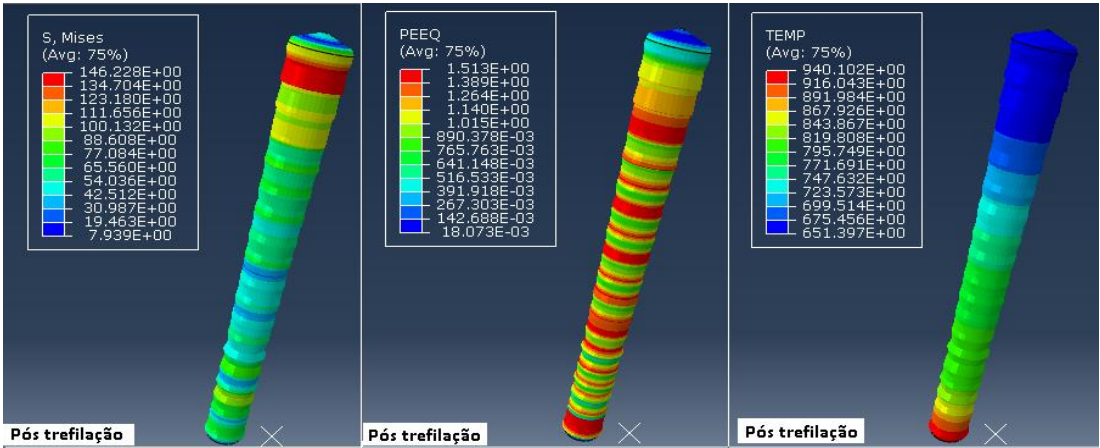


Figura 5. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para um semiângulo de entrada de 40°

A seguir foi elaborado a Tabela 2 com os resultados de Tensão máxima equivalente, máxima deformação plástica e temperatura máxima das três simulações. Com isso, permite uma melhor visualização dos efeitos provocados pelo aumento do semiângulo de entrada.

Tabela 2. Resultados da simulação para diferentes valores do semiângulo de entrada

Simulação	Semiângulo de entrada (graus)	Temperatura máxima (°C)	PEEQ	Smises (MPa)
a)	5	1056	0,40	24,36
b)	15	1009	0,49	38,10
c)	40	940	1,51	146,2

Ao analisar a Tabela 2, percebe-se que o aumento do semiângulo de entrada da fieira provoca o aumento da tensão equivalente de Mises e, conseqüentemente, da deformação plástica; na medida que a temperatura de trefilação diminui. O semiângulo de entrada caracteriza o nível da deformação plástica introduzida no material. Portanto, elevados semiângulos provocará maiores tensões de Mises. De acordo com Soares (2012), a tensão de Mises relaciona o nível de escoamento do material quando sujeito a carregamentos externos. Portanto, maiores tensões durante o processo de trefilação acarretam em maiores níveis de escoamento plástica no material durante a sua passagem pela fieira, como exposto na Tabela 2.

O aumento do semiângulo de entrada provoca a diminuição da aresta de contato entre o fio-fieira, ocasionando uma má distribuição das tensões ao longo do fio. Na figura 5, está explícito a distribuição das tensões ao longo da barra. Para um semiângulo de entrada equivalente a 40°, obteve concentrações de tensões ao longo da barra, o que provocou diferentes níveis de deformação no perfil trefilado, gerando defeitos superficiais. Portanto, semiângulo de entrada elevado irá influenciar nas tensões residuais do perfil trefilado, pois a fieira irá aplicar maiores deformações heterogênea no fio (LU, 1996). Santos (2005 a) afirma que semiângulos elevados conduziram uma maior heterogeneidade das propriedades mecânicas na sessão transversal e um maior encruamento nas camadas externas.

3.2.2. Zona Cilíndrica

A quarta simulação consistiu em analisar os efeitos provocados no fio trefilado devida a variação do parâmetro zona cilíndrica (L). Para isso, adotou um comprimento L de 1,906 mm. Os resultados estão expostos na Fig. 6.

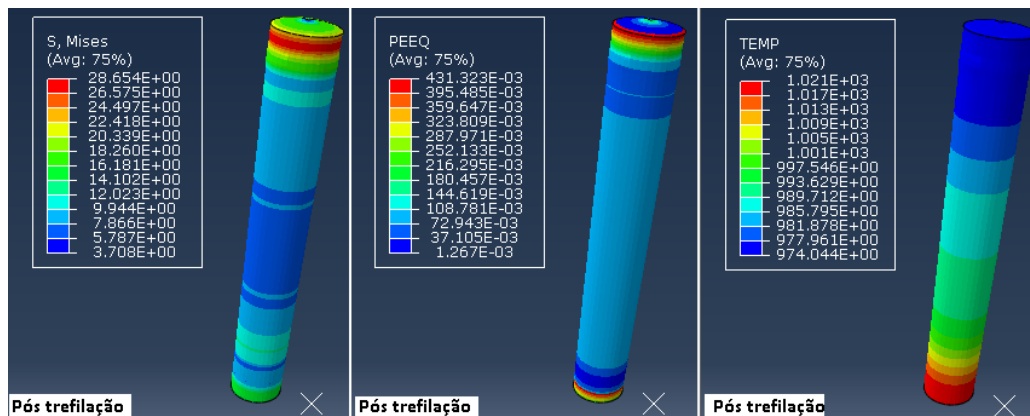


Figura 6. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para zona cilíndrica de 1,906 mm

Para a quinta simulação, adotou-se um comprimento para a zona cilíndrica equivalente a 3,176mm. Comparando os resultados obtidos com os valores da terceira simulação, não foi observado grandes mudanças na deformação plástica equivalente, nem na tensão de Mises, apenas na temperatura, conforme ilustra na Fig. 7.

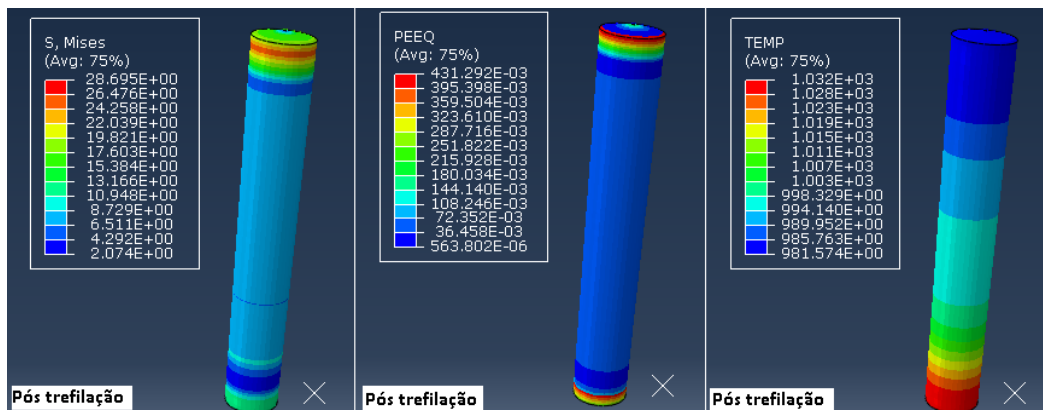


Figura 7. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para zona cilíndrica de 3,176 mm

A sexta simulação objetivou-se em aumentar exageradamente a zona cilíndrica, com um comprimento equivalente a 9,530 mm. Realizou-se a coleta dos resultados, explícitos na Fig. 8. Observa-se que houve uma mudança apenas na temperatura da barra.

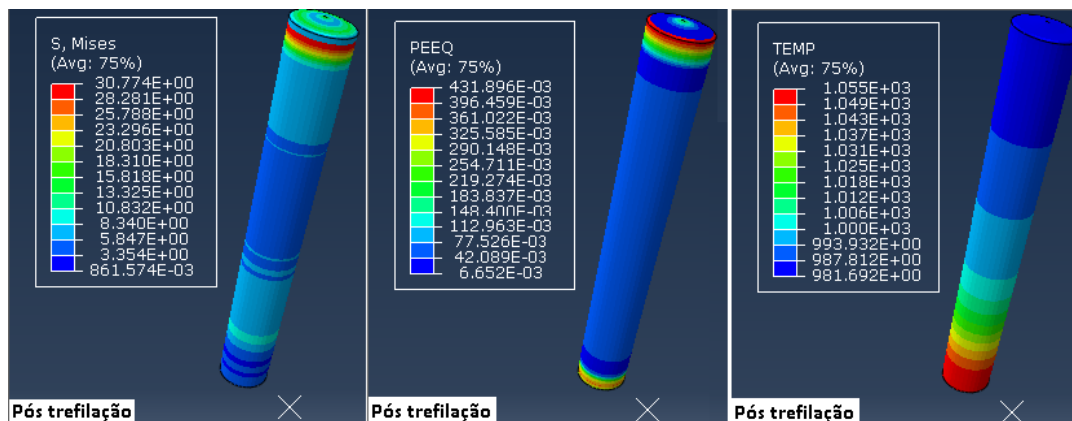


Figura 8. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para zona cilíndrica de 9,530 mm

Analisando os resultados obtidos pela variação da zona cilíndrica, constatou-se que esse parâmetro não provoca impactos significativos no comportamento da tensão e da deformação equivalente, apenas na temperatura. Como exposto por Santos (2005 b), o controle dimensional do produto e a vida útil da fieira são dependentes da região de calibração, pois o aumento da zona cilíndrica provoca o acréscimo do contato fio-fieira, aumentando a temperatura do processo. Isto é, dificilmente ocasionará danos no material.

3.2.3. Variação da velocidade de trefilação

A sétima simulação foi realizada com o objetivo de mensurar os impactos que o parâmetro velocidade de trefilação teriam durante o processo de trefilação. Para isso, adotou-se uma velocidade de 50 mm/s. Os resultados foram coletados e estão representados na Fig. 9.

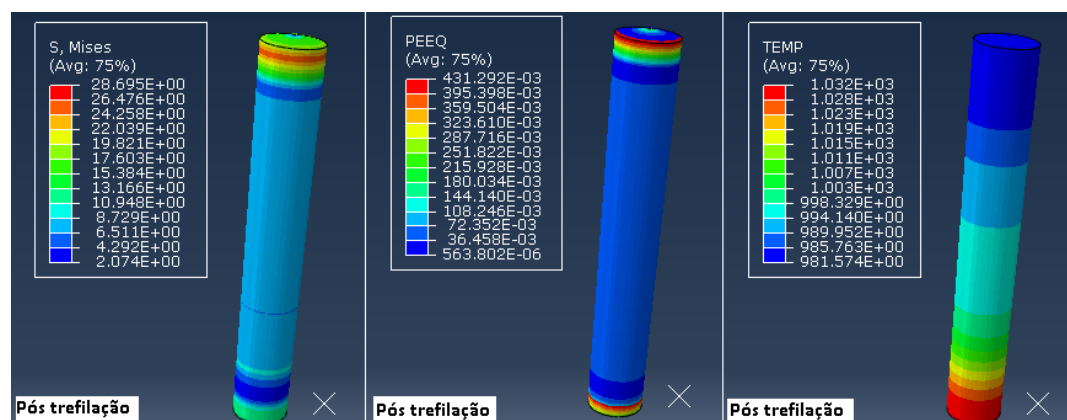


Figura 9. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para a velocidade de trefilação de 50 mm/s

A seguir, foi realizado a oitava simulação, que consistiu em aumentar em 2 vezes a velocidade de trefilação. Analisando os resultados obtidos da simulação, vide Fig 10, nota-se que há um decaimento nos valores da tensão equivalente de Mises, e da temperatura máxima durante o processo de trefilação. Por outro lado, o aumento da velocidade de trefilação resultou em um acréscimo da deformação plástica equivalente. Foi observado também a presença de danos na superfície do material.

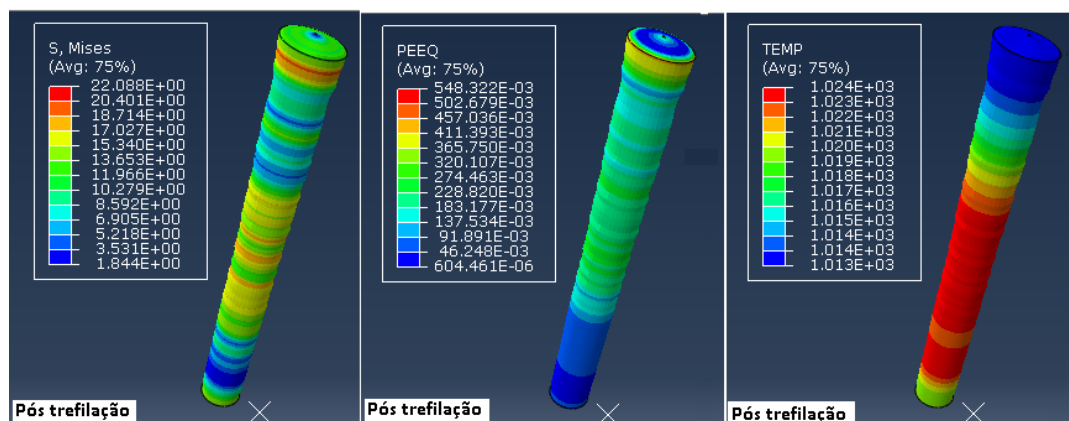


Figura 10. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para a velocidade de trefilação de 100 mm/s

Para a nona simulação foi adotado uma velocidade de trefilação equivalente a 150 mm/s. Vale salientar que houve danos superficiais no fio trefilado para uma velocidade de 100 mm/s. Desta vez, ao simular no *Abaqus* uma velocidade de trefilação acima de 100mm/s – para um semiângulo de entrada de 9°, redução de área de 10% e um comprimento de calibração de 3,176 mm – tem-se então o rompimento do fio de cobre, conforme ilustra a Fig. 11.

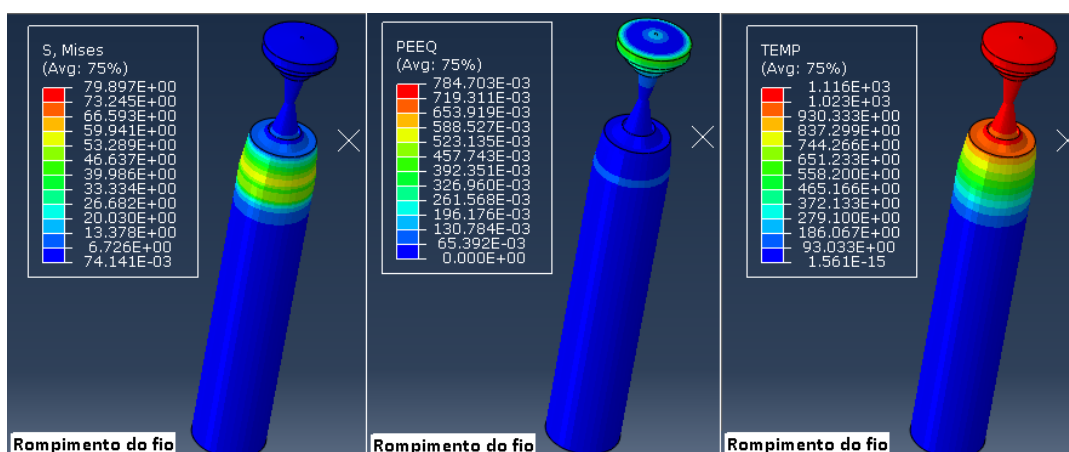


Figura 11. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para a velocidade de trefilação de 150 mm/s

Para realizar as devidas análises, montou-se então a Tabela 3 que contém os valores da Tensão equivalente máxima, deformação plástica máxima e de temperatura máxima para cada velocidade adotada nas simulações.

Tabela 3. Resultados obtidos das simulações referentes a variação da velocidade de trefilação

Simulação	Velocidade de trefilação (mm/s)	Temperatura máxima (°C)	PEEQ	Smises(Mpa)
a)	50	1032	0,431	28,69
b)	100	1024	0,548	22,08
c)	150	1242	0,432	89,69

A velocidade de trefilação determina a taxa de deformação do material durante o processo de trefilação. A taxa com que o material irá deformar pode ser benéfico ou não para o material trefilado, conforme exposta na simulação a) e b) representadas na Tab. 3, onde foi constatado a diminuição da tensão de Mises e o aumento da deformação plástica equivalente. Porém, taxas de deformações elevadas pode provocar concentrações das tensões no fio, conforme apresentado na simulação c).

Analisando a Tab. 3, observa-se que a temperatura de trefilação aumenta conforme a velocidade de trefilação acresce. Segundo Wright (2016), o acréscimo da velocidade de trefilação resulta no aumento da viscosidade e da espessura da

camada do lubrificante, impedindo que a lubrificação do fio ocorra na região do cone de trabalho na fiação. Com isso, tem-se o aumento do atrito e, conseqüentemente, altas temperaturas durante a trefilação.

Não obstante, o aumento excessivo da temperatura do fio, decorrente do aumento da velocidade de trefilação, diminui a qualidade do produto trefilado. Como observado na Fig 10, o fio trefilado apresentou defeitos superficiais, que podem favorecer a iniciação e a propagação de trincas. E como ilustrado na Fig.11, o aumento exagerado da velocidade de trefilação ocasionou a ruptura do fio. Aumentar a velocidade de trefilação consiste em aumentar a potência com que o material será tracionado pela máquina. Portanto, haverá o aumento das forças durante o processo e, por conseguinte, aumentando os níveis de tensões residuais no material trefilado. Pinto (2016) constatou que as velocidades de trefilação influenciam, de forma significativa, no encruamento do material.

3.2.4 Redução de área

Por fim, as três últimas simulações consistiram em analisar o parâmetro redução de área. A décima simulação, cujo os valores obtidos estão representados na Fig. 12, consistiu em uma redução de área de 10%.

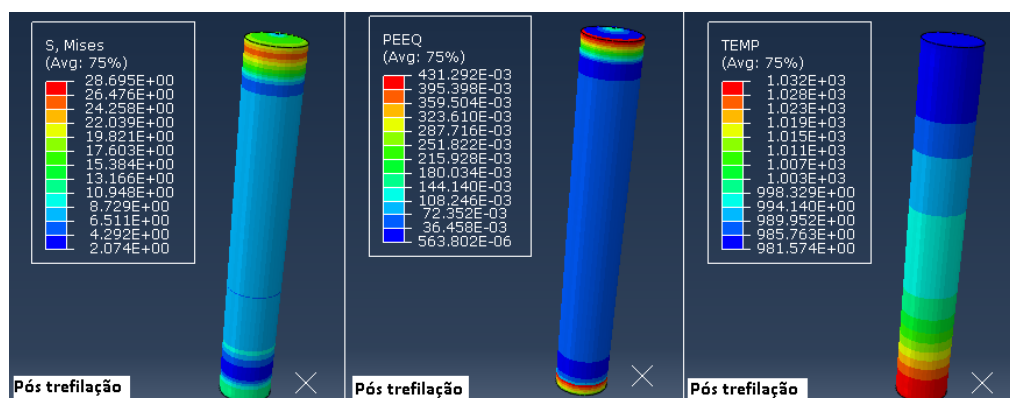


Figura 12. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para uma redução de área de 10%

Na décima primeira simulação, houve o aumento de 1% na redução de área. Esse pequeno aumento no parâmetro redução de área, provocou mudanças significativas na tensão equivalente, na deformação plástica e na temperatura no processo de trefilação. Os resultados obtidos para uma redução de área equivalente a 11% estão representados na Fig. 13.

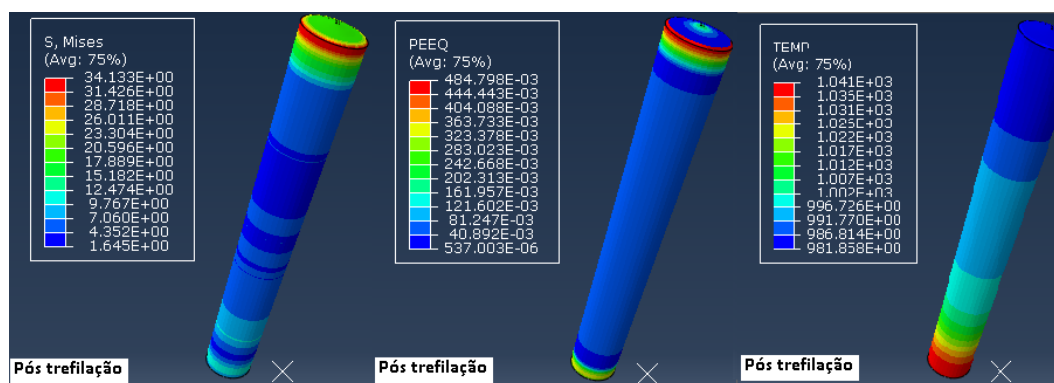


Figura 13. Campo de deformação (PEEQ), Tensão (Smises) e Temperatura (T) obtidos para uma redução de área de 11%

A décima segunda simulação a redução de área foi de 15%. Esse aumento significativamente alto da redução de área levou a ruptura do fio. Os resultados estão expostos na Figura 14, com a representação do início da estrição logo no início do projeto e, a posteriori, a representação do fio rompido.

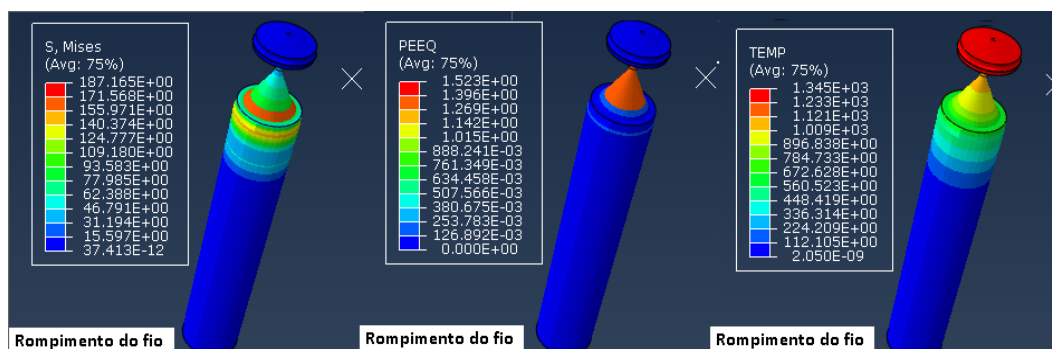


Figura 14. Variação de PEEQ, Smises e T obtidos para uma redução de área de 15%

A seguir foi feito a análise dos resultados observando a Tab 4, que contém os resultados obtidos referentes ao aumento da redução de área.

Tabela 4. Resultados obtidos das simulações referentes ao aumento da redução de área

Simulação	Redução de área (%)	Temperatura máxima (°C)	PEEQ	Smises(Mpa)
a)	10	1032	0,430	28,69
b)	11	1041	0,484	34,13
c)	15	1387	0,447	107,00

A mudança no parâmetro redução de área mostrou-se um parâmetro bem delicado, visto que pequenas variações ocasionaram em grandes mudanças nos valores da tensão equivalente, da deformação equivalente e da temperatura e, consequentemente, no produto final trefilado. Na prática, o processo de trefilação do fio é feito em vários passes, e a redução de área é feita gradualmente em vários estágios.

A diminuição da área de passagem do fio provoca a elevação das tensões residuais no perfil trefilado. Um menor orifício de passagem exige uma tensão de tração maior na extremidade da barra. Por outro lado, a fieira deverá exercer maiores esforços compressivos para que ocorra a passagem da barra quando ela entrar em contato com o canal convergente. Segundo Nakagawa (2001), maiores reduções de área fazem com que a fieira exerça maiores esforços cisalhantes no perfil durante o processo, levando ao acréscimo da deformação por cisalhamento na superfície do fio, provocando aumento das deformações heterogêneas no fio.

Outra consequência da diminuição da área de passagem da fieira é o aumento considerável da temperatura, ocasionado pelo aumento da fricção entre fio-fieira. Essa combinação de esforços elevados com o aumento da temperatura ocorre a ruptura do fio, como ilustrado na Fig. 14.

3. CONCLUSÕES

A previsão da temperatura, da deformação plástica e da tensão equivalente de Mises foi satisfatória e condizente com os resultados obtidos em processos reais de trefilação. Resultado este obtido através do modelo desenvolvido por Johnson-Cook em conjuntamente com o programa comercial *Abaqus*.

A partir dos dados obtidos, foi possível concluir como o aumento da velocidade de trefilação pode ocasionar a ruptura do fio e diminuir a qualidade do produto trefilado. Observou-se que a variação do parâmetro zona cilíndrica, não gerou impactos significativos no comportamento da deformação plástica e na tensão equivalente. Com as simulações, pôde-se concluir que aumentar o semiângulo de entrada causa uma diminuição na área de contato da ferramenta com o fio, provocando uma má distribuição das tensões na superfície do material trefilado, além de ter menores deformações e temperatura elevada. Por fim, como uma pequena mudança do parâmetro redução de área provocou grandes variações no comportamento da tensão equivalente, da temperatura e da deformação plástica equivalente.

4. REFERÊNCIAS

- Castro, M. O. D. 2015. Modelagem não linear de elementos finitos do processo de trefilação incluindo fricção.
FILHO, E. B. et al, 1997. *Conformação plástica dos metais*. [S.l.]: Ed da Unicamp
LU, J. Handbook of measurement of residual stresses, ed. cetim. Society for Experimental Mechanics SEM, 1996.
NAKAGAWA, E.; NAKAGIRI, A.; YAMANO, T.; INAKAZU, N. 705 behavior of residual stress and texture in drawing of the steel wire. In: . [S.l.: s.n.], 2001.

- PINTO, D. F. 2016. Velocidade de trefilação e seu efeito no encruamento e no acabamento superficial de um aço SAE 1008. <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/6513>
- SANTOS, C. A. dos 2005. Simulação numérica da trefilação axissimétrica do aço inoxidável 420 considerando o efeito do caminho de deformação. Universidade Federal de Minas Gerais.
- SOARES, C. A. T. Análise das tensões residuais no processo de trefilação considerando os efeitos de anisotropia. 2012.
- WRIGHT, R. N. Wire technology: process engineering and metallurgy. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2016.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

NUMERICAL SIMULATION THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD OF THE DRAWING PROCESS OF A COPPER WIRE

Elizeu Fonseca Correia

Lucival Malcher

Instituição e endereço Universidade de Brasília, UnB – Brasília, DF, 70910-900
e-mails 160118794@aluno.unb.br, malcher@unb.br

Abstract. *In this work, the study of the drawing process was carried out through numerical simulation using the Finite Element Method (FEM). The simulation was performed in the commercial program Abaqus and the material adopted for the study was oxygen-free copper. Methodologically, this work initially consisted of modeling the problem in Abaqus using the Johnson-Cook (JC) model as a damage indicator. The JC model implements in the simulation the effects of plastic deformation, load application speed, and temperature. Through this model, it became possible to compute the damage to the material through the loss of its ductility. After finishing the simulation setup, and the mesh convergence study, the process parameters were varied to study and evaluate the influence that each criterion has on the equivalent strain rate, the equivalent plastic deformation strain, and the effect of temperature. Finally, it was found that the length of the cylindrical zone does not interfere with the behavior of the equivalent stress and plastic deformation, only in the process temperature. A small change in the area reduction parameter led to large changes in the values of equivalent stress, plastic deformation, and temperature. On the other hand, increasing the drawing speed can be beneficial in the drawing process, but up to certain levels; considering that excessively high drawing speeds can cause wire fracture. Finally, it was observed that as the input semi-angle parameter increases, the plastic deformation and the equivalent stress increase, while the drawing temperature decreases.*

Keywords: Wire drawing, Parameters of Drawing, Numerical simulation, Finite element method, Johnson-Cook Model

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.